

联合多种测高数据建立高分辨率 中国海平均海面高模型

李建成¹ 姜卫平¹ 章磊²

(1 武汉大学测绘科学与技术学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 国家基础地理信息中心, 北京市紫竹院百胜村 1 号, 100044)

摘要: 利用经过编辑和环境改正后的多代卫星测高资料, 通过联合交叉点平差以削弱径向轨道误差和不同卫星测高任务之间的系统偏差等因素的影响, 建立了中国海域及邻海($1^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\text{E}\sim 137^{\circ}\text{E}$) $2.5'\times 2.5'$ 平均海平面高模型, 并将其与 CLS-SHOM98.2、GFZ MSS95A 和 OSU MSS95 平均海平面高模型进行了比较。

关键词: 卫星测高; 平均海平面; 交叉点平差

中图法分类号: P228.3

平均海面(MSS)是当今地球科学和环境科学所关注的问题之一。相对于参考椭球, 它包括了大地水准面和海面地形两部分, 因而被大地测量学家和地球物理学家广泛地用来分析大地水准面差距、研究地壳形变和地球内部动力学机制等。海洋学者则以平均海平面为基准, 用来研究海面高、大洋环流等问题。自从测高卫星出现以来, 由于其提供了迄今最丰富的海平面高信息, 国外一些研究机构利用这一信息源已先后推出多个平均海平面高模型, 如 $3.75'\times 3.75'$ 格网分辨率的 OSU MSS95 模型(Rapp R H 等, 1994)、 $3.75'\times 3.75'$ 格网分辨率的 CLS-SHOM98.2 模型以及 $3'\times 3'$ 格网分辨率的 GFZ MSS95A 模型。我国学者也利用卫星测高建立了中国海及邻海的海面高模型, 但分辨率较低, 一般在 $30'\times 30'$ 左右(王海瑛, 1999)。在这些海面高模型中, OSU MSS95、CLS-SHOM98.2 和 GFZ MSS95A 比较有代表性。OSU95 海面高模型是美国 OSU 利用 GEOSAT、ERS-1 和 T/P 测高数据联合求出的一个较高精度的平均海平面高模型, 它的参考椭球是 T/P 所用的参考椭球, 现较为广泛地应用于海洋学、地球物理等学科的研究, 它是 GEOSAT、T/P 等测高卫星数据的参考海平面。MSS95A 海面高模型是德国 GFZ 建立的一个海平面模型, 它的上一个版

本 MSS93A 是 ERS1 测高数据的参考海平面, 但由于其确定轨道所用的重力场不同, 与别的海平面模型比较有一个较大的系统差。CLS-SHOM98.2 海面高模型是由法国的 CLS 利用 GEOSAT、ERS-1 和 T/P 测高数据来确定的分辨率为 $3.75'\times 3.75'$ 的一个高精度平均海平面, 它的参考椭球是 T/P 所用的参考椭球, 其目标是为 JASON-1、ENVISAT、GFO (GEOSAT follow on) 等卫星测高观测值提供参考海平面。随着更多的重复轨道数据可供使用和环境误差改正的不断更新和改进, 使平均海平面的确定在分辨率和精度方面也不断得到改进。

本文研究的主要内容是利用经过编辑和环境改正后的多代卫星测高资料, 通过交叉点平差削弱包括径向轨道误差在内的测高误差以及海洋活动等因素对测高观测值的影响, 确定中国海域及邻海($1^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\text{E}\sim 137^{\circ}\text{E}$) $2.5'\times 2.5'$ 平均海平面高模型。

1 所采用的数据

建立中国海及邻海 $2.5'\times 2.5'$ 平均海平面高模型采用 3 年的 T/P 数据(第 20~129 周期)、1 年的 ERS-1/168 大地测量任务数据、2 年的

GEOSAT/ERM (第 1~42 周期) 数据以及 4 年的 ERS-2 数据 (第 1~45 个周期)。数据编辑准则以参考数据用户手册为基础 (Cheney R E, 1987; AVISO, 1996; CERSAT, 1996; NOAA, 1997), 综合国内外同行的先进经验 (Denker H and Rapp R H, 1991; Hwang C, 1989; 陈俊勇等, 1995; 邓晓丽, 1996), 制定了比较全面的数据编辑准则, 并对 GEOSAT、ERS-1/2 和 T/P 等多代卫星测高原始数据进行了编辑处理, 剔除无效观测记录并作了相应的地球物理和环境改正。

由于具有重复轨道的测高卫星轨道重复精度在 1km 左右, 对于 $2.5' \times 2.5'$ 的格网分辨率 (约 4km) 而言, 各周期在相同位置的观测值对确定相应格网点值的贡献大致相同, 因此, 对各卫星重复轨道数据进行共线平均 (ERS-1/168 任务的轨道不是重复轨道, 不能进行共线平均), 计算其平均轨道和平均海平面高。虽然计算正常点可平滑卫星轨道、降低随机噪声的影响, 但同时也会降低测高数据沿轨迹的分辨率。考虑到确定平均海平面分辨率 ($2.5' \times 2.5'$) 的要求, 本文在共线平均时, 未对测高观测值进行正常点计算。共线平均的步骤如下。

1) 分别对 110 个周期的 T/P、45 个周期的 ERS-2/35 和 42 个周期的 GEOSAT/ERM 数据进行共线平均;

2) 剔除与平均值之差的绝对值大于 1m 的海平面观测值;

3) 重新计算新的平均海平面高, 形成各测高卫星的平均轨道。

对测高数据进行共线平均不仅可以减弱海平面高的时变影响, 还可以减弱在某一特定时期发生的大范围海洋学异常现象 (如厄尔尼诺和拉尼娜现象) 所引起的海平面异常变化, 因而其精度要好于分别采用单一周期的观测结果。经过上述处理, 观测值精度如表 1 所示。平均轨迹交叉点的海平面高不符值得到了较大幅度的降低, 表明通过时间平均, 可以有效地削弱主要来自海平面高异常变化产生的测高数据短波误差。

图 1 为用于数据处理的全部测高数据分布图。从图中可以看出, 测高数据的密度较高, 在开阔洋区的分布也较均匀, 可以满足确定高分辨率 ($2.5' \times 2.5'$) 平均海平面高模型的数据要求。另外, 图中数据稀少和空白区域表明, 沿琉球群岛、台湾群岛、菲律宾群岛的第一岛链地区, 朝鲜半岛与日本近海地区以及我国渤海海域, 由于受岛礁、大陆近海等复杂地理环境的综合影响, 测高观测

值因准确性大大降低而无法使用。因此, 上述地区的数据在对测高观测值进行编辑的过程中因误差过大而被大量剔除。

表 1 平均前后交叉点不符值 RMS 统计结果/m

Tab. 1 RMS of the Crossovers Difference before and after Mean/m

	平均前 RMS	平均后 RMS
TOPEX	0.099	0.026
ERS-2/35	0.211	0.080
GEOSAT/ERM	0.188	0.099

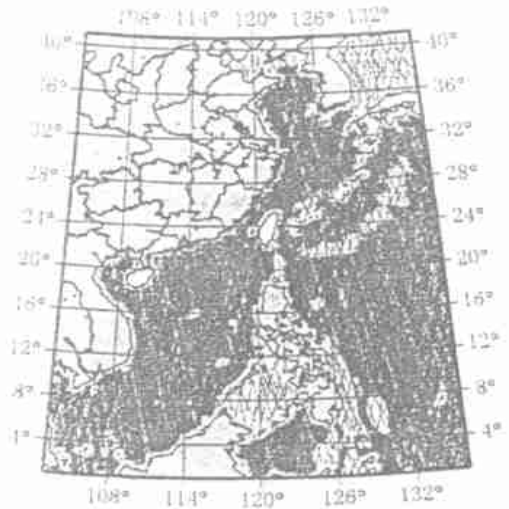


图 1 测高数据分布图

Fig. 1 The Altimeter Data of Multi-satellite

2 多种测高数据联合交叉点平差

T/P 数据比其他卫星测高数据的观测精度要高, 故本文固定 T/P 平均数据作为联合交叉点平差的参考基准, 通过联合交叉点平差, 对 ERS-2、GEOSAT/ERM、ERS-1/168 的海平面高观测值中所包含的各种残余误差进行改正, 以提高其观测值精度。考虑到测高卫星地面轨迹并非总是连续的, 特别是当轨迹通过陆地、岛屿时, 数据中断现象时有发生, 因此, 本文采用对轨迹中断时间超过 1.2s 的各个子弧段分别采用截距-斜率式直线方程进行拟合。其中, 对在平差区域内通过时间小于 100s 的弧段, 以 1 个轨道误差参数即常数项平移参量, 其他的拟合轨道误差参数个数为 2。采用这种方法, 虽然工作量有所增大, 但拟合精度将会因拟合弧段长度的缩短而提高。

由 ERS-2、GEOSAT/ERM 和 ERS-1/168 的每条弧段分别与 T/P 的弧段交叉求解径向轨道误差参数。确定交叉点的方式为升弧与降弧组合, 具体为: ERS-2 ~ GEOSAT/ERM、ERS-2 ~ ERS-2、ERS-2 ~ ERS-1/168、ERS-2 ~ T/P、ERS-1

~GEOSAT/ERM、ERS-1 ~ ERS-1、ERS-1 ~ T/P、GEOSAT/ERM ~ GEOSAT/ERM、GEOSAT/ERM ~ T/P等9种组合。表2为采用的观测量,表3为交叉点统计结果。

T/P数据因在联合交叉点平差过程中被固定,未参与观测值改正,精度保持不变。表4为平差前后交叉点不符值(RMS)统计结果。从表4可以看出,经过平差改正后的ERS-2和GEOSAT/ERM平均轨迹交叉点的RMS值都在5~6cm水平,而ERS-1/168数据精度虽然有显著提高,但由于数据中包含了交叉点平差不能消除的海平面高短波变化及时变的影响,其RMS仍有14.2cm,可以通过建立动力海面地形模型来削弱。

表4 平差前后交叉点不符值 RMS 统计结果/m

Tab. 4 RMS of the Crossovers Difference between Missions before and after Adjustment/m

	测高数据	T/P	ERS-2	GEOSAT/ERM	ERS-1/168
交叉点平差前	T/P	0.026	0.074	0.231	0.275
	ERS-2		0.080	0.238	0.292
	GEOSAT/ERM			0.099	0.462
	ERS-1/168				0.192
交叉点平差后	T/P	0.026	0.047	0.066	0.111
	ERS-2		0.046	0.090	0.137
	GEOSAT/ERM			0.065	0.144
	ERS-1/168				0.142

在此基础上,对改正后的海平面高观测值进行了平滑处理,通过与数据中给出的相应海平面模型计算值的比较,剔除差值绝对值大于0.6m的海平面高观测值(共计11574个,其中ERS-1/168数据剔除11163个;ERS-2数据剔除385个;GEOSAT/ERM数据剔除26个)。

3 确定中国海域平均海平面高模型

对沿地面轨迹的离散点测值格网化平均时,考虑了格网间距的合理选取和用于格网化的数据图形结构,格网化算法采用的是以球面坐标形式表示的Shepard算法,它属于谐核函数法中的一种。本文拟合因子取 $\mu=2$,即以 $2/\Psi^2$ 定权;局部拟合半径取2倍的格网间距($S=5'$)。通过以上计算,求出格网点的平均海平面高,从而最终确定中国海域 $2.5' \times 2.5'$ 平均海平面高模型。利用GMT绘图软件将平均海平面高格网值拟合绘制成等高距为2m的等值线栅格图(见图2)。

图2表明,中国海域及其邻海的平均海平面相对于参考椭球呈由西向东逐渐升高的倾斜状态,以最西部的中国近海——北部湾为最低

表2 所采用的测高观测值数量

Tab. 2 The Number of Altimeter Data

	T/P	ERS-2	GEOSAT/ERM	ERS-1/168
观测值数量	6 818	34 733	16 438	241 779
合计			299 768	

表3 交叉点统计结果

Tab. 3 The Result of Multi-satellite Crossover

测高数据	T/P	ERS-2	GEOSAT/ERM	ERS-1/168
T/P		231	116	1 495
ERS-2		633	953	8 472
GEOSAT/ERM			218	6 257
ERS-1/168				34 572
合计			52 947	

(-20m),菲律宾群岛东南方向为最高(70m),差异达90m。图2也从另一方面反映出,图1中数据空白地区的平均海平面高由于观测数据不足且精度较差,表现出无规律的大幅度异常变化,其精度和可靠程度相对于其他地区也最为薄弱。这些地区可以通过模型来填补。

4 与 CLS-SHOM98.2、GFZ MSS95A 和 OSU MSS95 平均海平面高模型比较

作为外部检核,本文将计算的平均海面高模型与CLS-SHOM98.2(分辨率为 $3.75' \times 3.75'$)、GFZ MSS95A(分辨率为 $3.0' \times 3.0'$)以及OSU MSS95(分辨率为 $3.75' \times 3.75'$)等3种全球平均海平面高模型在中国海及其邻海区域内进行了数值比较和验证。

GFZ MSS95A与OSU MSS95在全球范围内海面差距的均值及RMS分别为(GFZ MSS95A-OSU MSS95): $0.277\text{m} \pm 0.240\text{m}$,而CLS-SHOM98.2与OSU MSS95在全球范围内差距的均值及RMS分别为: $0.0\text{m} \pm 10.2\text{m}$ 。在本文所

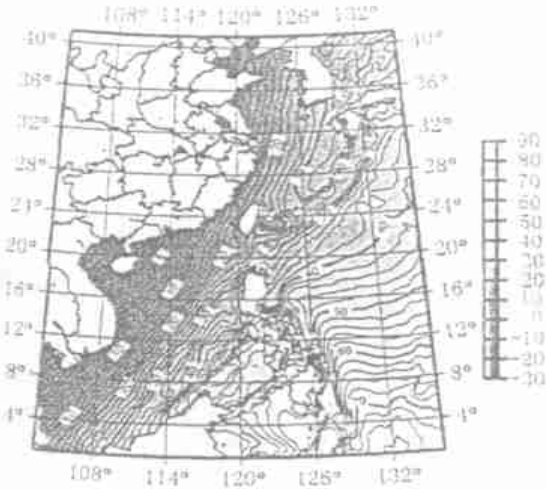


图 2 2.5' × 2.5' 中国海域及邻海平均海平面
(1°N ~ 41°N, 103°E ~ 137°E)

Fig. 2 The 2.5' × 2.5' MSS Model of China Sea
and Its adjacent Sea Areas
(1°N ~ 41°N, 103°E ~ 137°E)

CLS-SHOM98.2 三者之间差距的均值及 RMS 如表 5 所示。从表 5 可知,GFZ MSS95A 与其他模型相差较大,这是因为其轨道所采用的重力场不同造成的。

表 5 不同海面高模型比较结果/m

(1°N ~ 41°N, 103°E ~ 137°E)

Tab. 5 Comparison of MSS Height Differences between Different MSSH Models/m (1°N ~ 41°N, 103°E ~ 137°E)

海面高模型	平均	RMS	STD
GFZ MSS95A-CLS-SHOM 98.2	0.372	0.459	0.268
GFZ MSS95A-OSU MSS95	0.270	0.356	0.233
OSU MSS95-CLS-SHOM98.2	0.095	0.140	0.103

将由本文所建立的模型与 GFZ MSS95A 和 CLS-SHOM98.2 在中国海及其邻海区域内进行了格网值比较。由于尚未得到 OSU MSS95 模型的格网值,本文利用 GEOSAT、ERS-2 和 T/P 原始数据中给出相应位置的 OSU MSS95 模型内插值,进行了内插值的比较。具体比较结果见表 6(表 6 和表 7 中的差值为各模型的值减本文模型的值)。

研究的范围内,GFZ MSS95A、OSU MSS95 与

表 6 利用全部数据的比较结果

Tab. 6 Statistics of MSS Height Differences Compared with Other MSS Models

海面高模型	最大/m	最小/m	平均/m	RMS/m	STD/m	总点数
CLS-SHOM98.2	3.107	-2.756	0.049	0.184	0.177	189 774
GFZ MSS95A	3.712	-4.492	0.335	0.417	0.248	292 192
OSU MSS95	1.832	-0.577	0.070	0.122	0.100	57 904

表 7 剔除偏差大于 0.5m 数据后的比较结果

Tab. 7 Statistics of MSS Height Differences Compared with Other MSS Models after Excluding Differences Greater than 0.5m

海面高模型	平均/m	RMS/m	STD/m	总点数
CLS-SHOM98.2	-0.050	0.138	0.129	185 566
GFZ MSS95A	0.257	0.298	0.152	237 220
OSU MSS95	0.069	0.120	0.098	57 825

从表 6 和表 7 可以看出,本文计算的中国海及其邻海平均海面高模型与 CLS-SHOM98.2、GFZ MSS95A 以及 OSU MSS95 的标准差分别是 0.177m、0.248m 和 0.100m。但考虑到有些点的误差较大,将大于 0.50m 的点删除以后,标准差分别是 0.129m、0.152m 和 0.098m。由表 5、表 6 和表 7 可见,本文所建立的中国海及邻海平均海面高模型是正确的,精度是可靠的。

致谢:感谢法国 CLS 的 Fabrice Hernandez 和德国 GFZ 的 Matthias Rentsch 提供的数据和相关资料。

参 考 文 献

- 1 陈俊勇,李建成,晁定波.用 T/P 测高数据确定中国海域及邻海的海面高及海面地形.武汉测绘科技大学学报,1995,20(4):321~326
- 2 邓晓丽,晁定波,陈俊勇.中国近海 TOPEX/POSEIDON 卫星测高数据处理的初步结果.测绘学报,1996,25(3):226~232
- 3 李建成,宁津生,晁定波.卫星测高在物理大地测量应用中的若干问题.武汉测绘科技大学学报,1996,21(1):9~14
- 4 王海瑛.中国近海卫星测高数据处理与应用研究:[学位论文].武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,1999
- 5 Aviso User Handbook. Merged Topex/Poseidon Products (GDR-Ms). AVF-NT-02-101-CN, 3rd ed, Aviso, 1996
- 6 User Manul. Altimeter & Microwave Radiometer ERS-Products. C2-MUT-A-01-IF, Ver2. 2, Cersat, 1996
- 7 Cheney R E, Douglas B C, A green R W, et al. Geosat Altimeter Geophysical Data Records user Handbook. Noaa Tech Memo, NOS NGS-46. Natl. Ocean Serv., Natl. Geod. Surv., Rockville, Md., 1987

- 8 Hwang C. High Precision Gravity Anomaly and Sea Surface Height Estimation from Geos-3/ Seasat Altimeter Data. Report No. 399. Dept. of Geod. Sci. and Surv., Columbus, Ohio State University, 1989
- 9 The Geosat Altimeter JGM-3 GDRs on CD-ROM. NODC Laboratory for Satellite Altimetry. NOAA, 1997
- 10 Rapp R H, Yi Y C, Wang Y M. Mean Sea Surface and Geoid Gradient Comparisons with TOPEX Data. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (C12): 24 657 ~ 24 667
- 11 Wang Y M. The Satellite Altimeter Data Derived Mean Sea Surface GSFC98. *Geophysical Research Letters* 2000 27(5): 701 ~ 704
- 12 Denker H, Rapp R H. Geodetic and Oceanographic Results From the Analysis of 1 Year of Geosat Data. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 95 (C8): 13 151 ~ 13 168

作者简介: 李建成, 教授, 博士生导师, 现从事物理大地测量学和空间大地测量学的研究。代表成果: 全球重力场的确定, 局部重力场的逼近和卫星测高学在大地测量中的应用; 联合多种卫星测高数据分析全球和中国海平面变化, 等。

E-mail: jeli@wtusm.edu.cn

High Resolution Mean Sea Surface Over China Sea Derived from Multi-satellite Altimeter Data

LI Jiancheng¹ JIANG Weiping¹ ZHANG Lei²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 National Geomatics Centre of China, 1 Baishencun, Zizhuyuan, Beijing, China 100044)

Abstract: Referenced to an earth ellipsoid, Mean Sea Surface (MSS) is made up of geoid and the dynamic ocean topography. So a high resolution and high quality MSS is a very valuable surface for geodesists and geophysicists. Because the instantaneous sea surface height (SSH) above a reference ellipsoid can be computed from satellite altimetry, MSS is derived from it. Several mean sea surfaces have been computed using satellite altimeter data and widely used. After reducing the geophysical and environment corrections, it is very important that reducing systematic biases between the missions and the residual orbit errors in the data.

Based on the editions and geophysical corrections of multi-satellite altimeter data (3-year T/P data, 4-year ERS-2/35 data, 2-year GEOSAT/ERM data and 1-year ERS-1/168 Geodetic Mission data), the orbit accuracy of ERS-2, GEOSAT/ERM data and ERS-1/168 geodetic mission data by using combined crossover adjustment with fixing the T/P mean orbits are improved, and the $2.5' \times 2.5'$ MSS model of China sea and its adjacent sea areas ($1^\circ\text{N} \sim 41^\circ\text{N}$, $103^\circ\text{E} \sim 137^\circ\text{E}$) is obtained. For reducing the magnitude of the errors caused by time variations, all repeat cycles data are averaged into mean tracks respectively. After averaging, the Root Mean Square (RMS) values of the differences between the sea surface heights at the crossover points for T/P, ERS-2, and GEOSAT are from 0.099m, 0.211m and 0.188m to 0.026m, 0.080m and 0.099m respectively. Because of systematic biases between the missions and the residual orbit errors in the data, ERS-2, GEOSAT/ERM data and ERS-1/168 Geodetic Mission data were adjusted to the TOPEX 3-year mean tracks. After multi-mission crossover adjustment, the RMS values of the differences between the sea surface heights at the crossover points for ERS-2, GEOSAT and ERS-1 are 0.046, 0.065 and 0.142 respectively. To compute the grid surfaces using the altimetric height as observations, the SHEPARD method was implemented. The MSS model is compared with the CLS-SHOM98, 2, GFZ MSS95A and OSU MSS95 model respectively, the corresponding RMS of the respective difference 0.138m, 0.298m and 0.120m, and the corresponding Standard Deviation (STD) of the respective difference is 0.129m, 0.152m and 0.098m.

Key words: altimetry; mean sea surface; crossover adjustment

About the author: LI Jiancheng, professor, Ph. D supervisor. His main research interests are the physical geodesy and space geodesy. His typical achievements include geopotential model determination, local gravity field approximation altimetry application in geodesy, mean sea level variation using historic satellite altimeter data, etc.

E-mail: jcli@wtusm.edu.cn

▲资料▲

合并后的武汉大学学部、学院的设置及内设本科专业情况

学部名称	学院名称	内设本科专业名称
人文科学学部	人文科学学院	哲学、汉语言、汉语言文学、戏剧影视文学、历史学、世界历史、博物馆学、考古学
	外国语言文学学院	英语、俄语、法语、德语、日语
	新闻与传播学院	新闻学、网络新闻(筹)、广播电视新闻、广播电视编导(筹)、播音与主持艺术(筹)、广告学、包装工程、印刷工程
社会科学学部	信息管理学院	编辑出版学、图书馆学、档案学、信息管理与信息系统
	商学院	经济学、国际经济与贸易、金融学、保险学、财政学、工商管理、市场营销、会计学、财务管理、旅游管理、工程管理
	法学院	法学、社会学、社会工作
	政治与行政学院	政治学与行政学、思想政治教育
	公共管理学院 国际关系学院(筹)	行政管理、公共事业管理、劳动与社会保障、土地资源管理(筹) 国际政治(筹)
理学部	数学与统计学院	数学与应用数学、信息与计算科学、统计学
	物理科学与技术学院	物理学、应用物理、电子科学与技术
	化学与分子科学学院	化学、应用化学
	生命科学学院	生物科学、生物技术、生态学、生物工程
	资源与环境科学学院 材料科学与工程学院	环境科学、环境工程、地理信息系统、地理信息系统(计算机地图制图学)、资源与城乡规划管理、土地资源(土地信息技术) 材料物理、材料化学、高分子材料与工程、无机非金属材料工程
工学部	水利水电学院 电气工程学院	农业水利工程、港口海岸及治河工程、水文与水资源工程、水利水电工程 电气系统及其自动化
	动力与机械学院	热能与动力工程、自动化、机械设计制造及其自动化、金属材料工程、材料成型及控制工程
	城市建设学院	建筑学、城市规划
	土木建筑工程学院	土木工程、工程力学、给排水工程
信息科学学部	计算机学院	计算机科学与技术
	光电信息工程学院	光电信息科学与技术、测控技术与仪器、电子信息科学与技术、电子信息工程、通信工程
	遥感信息工程学院 测绘科学与技术学院	电子信息工程(遥感信息工程、摄影测量与遥感)、地理信息系统(空间信息工程) 地理物理学、测绘工程、卫星应用技术
医学部	基础医学院	基础医学、法医学(筹)
	第一临床学院	临床医学、麻醉学、医学影像学
	第二临床学院	临床医学、医学检验、护理学
	口腔医学院	口腔医学
	药学院(筹) 公共卫生学院(筹)	药物制剂、药学 预防医学